Zinc

The aesthetic objective for zinc is *≤5.0 mg/L*. Zinc is an essential element and is generally considered to be non-toxic. Intake of zinc from food is more than sufficient to satisfy the recommended daily requirements. Drinking water is not regarded as an important nutritional source of this element. Water containing zinc at concentrations above 5.0 mg/L tends to be opalescent, develops a greasy film when boiled, and has an undesirable astringent taste.

General

Zinc is an abundant element and constitutes approximately 0.004 percent of the Earth's substance.[1] The most common zinc mineral is sphalerite (ZnS), which is often associated with the sulphides of other metallic elements, e.g., lead, copper, cadmium, and iron.[2] Zinc is also found as calamine ($ZnCO_3$) in carbonate sediments; other forms of zinc are usually products of the oxidation of sphalerite.[2,3]

During 1984, the zinc content of ores and concentrates produced in Canada was 1 207 098 tonnes; domestic zinc consumption was 150 528 tonnes.[4] Canadian zinc reserves in known deposits have been estimated at 20 492 700 tonnes.[4] The main use for zinc in Canada is for galvanizing iron and steel, which accounted for 40 percent of the zinc consumption in 1984. A further 20 percent went towards the production of brass plumbing and heating fittings, and 15 percent was used in the die-casting industry to produce builders' hardware and automobile fittings.[5] The remaining consumption of zinc is divided among many industries. Zinc oxide is used in the manufacture of paints, rubber, rayons, yarns, inks, matches, and chemicals; zinc "dust" is used in printing, textile dyeing, and fat purification, and for cementing metals in metallurgical processing; rolled zinc is used in ornamental work and batteries; and zinc salts are used as wood preservatives and pesticides.

Occurrence

Industrial and domestic emissions contribute a considerable quantity of zinc to the air and water environments. In Canada during 1972, primary iron and steel production accounted for the emission of 2690 tonnes of zinc (in the form of zinc oxide) to the atmosphere. Primary copper and nickel production contributed a similar quantity (2290 tonnes). Total industrial emissions of zinc amounted to 6340 tonnes. Fuel combustion from stationary sources (coal and heavy oils) added a further 134 tonnes. Transportation, solid waste incineration, and pesticide application contributed 794, 124, and 1.8 tonnes, respectively. Emissions from all sources for 1972 totalled 7400 tonnes.[5]

In a 1980 study, it was estimated that the annual contribution of zinc to the Canadian environment from natural and anthropogenic sources was 768 000 and 414 000 tonnes, respectively.[6]

Analyses for zinc in airborne particulate matter over urban areas showed concentrations ranging from 0.32 mg/g in Toronto to 5.40 mg/g in Vancouver.[7] Concentrations as high as 6 mg/g were found in dust along Toronto's waterfront.[8]

Analyses of the total suspended particulates in the air over Edmonton during 1978 and 1979 showed a mean concentration of 0.085 $\mu g/m^3$ with little seasonal variation. During one event in November 1978, the concentration reached 0.6 $\mu g/m^3$, possibly as a result of fugitive emissions from incinerators.[9]

In a 1982 survey across Ontario, the spatial pattern of precipitation and air quality regarding trace metal content, including zinc, was monitored.[10] The mean air concentration of zinc ranged from 0.019 $\mu g/m^3$ in the south to 0.007 $\mu g/m^3$ in the north. Similarly, the annual dry deposition of zinc ranged from 1.51 $\mu g/m^2$ in the south to 0.51 $\mu g/m^2$ in the north. The mean concentration of zinc in the annual precipitation ranged from 0.0083 mg/L in the south to 0.0055 mg/L in the north.[8] The trace metal concentration across Ontario showed a general decreasing trend from south to north. The quantity of zinc found in precipitation reflects the presence of zinc-emitting operations. The mean concentration of zinc in precipitation near Sudbury, Ontario, during 1972 to 1973 was 0.028 mg/L, but reached 120 mg/L during one rainfall.[11] The average concentration of zinc in rain falling in the United States was 0.107 mg/L.[12]

In unpolluted snow sampled in a remote area of northern Manitoba, the concentrations of zinc were less than 0.001 mg/L.[11]

The average soil concentration of zinc in Canada is 90 mg/kg.[7] A similar value was found in soils not associated with sulphide ores in New Brunswick.[13] The zinc content of representative soils from industrial locations in Canada ranged from 106 to 2095 mg/kg (the maximum value was found in Toronto).[8] Urban soil samples from Vancouver and Toronto contained 395 and 220 mg/kg, respectively.[7]

The carbonates, oxides, and sulphides of zinc are sparingly soluble, and therefore zinc is present in natural waters at low concentrations. The highly soluble chloride and sulphate salts are hydrolyzed to form the hydroxide and carbonate. Adsorption onto hydrolysate sediments further depletes the levels of dissolved zinc.[3]

The environmental concentration of zinc in Canadian surface waters ranged from 0.001 mg/L to a high of 1.17 mg/L over a 1980 to 1985 sampling period.[14] Analysis of several lakes in Ontario (used as sources of drinking water) showed that the mean concentration of zinc was less than 0.010 mg/L.[15]

In surveys of river water in central and western Canada, it was found that the level of zinc varied widely with both the location and the season. The range was 0.001 to 0.096 mg/L, with maximum levels observed in the Slave River in the Northwest Territories; normally, the concentrations in river water do not exceed 0.04 mg/L.[16]

The concentration of zinc can be considerably higher in tap water than in surface water because of the leaching of zinc from galvanized pipes, hot water tanks, and brass fittings.[17]

In a national survey of Canadian drinking water supplies, it was found that the median zinc content in the raw, treated, and distributed water samples rarely exceeded 0.01 mg/L. However, zinc was frequently picked up while passing through the distribution network. In New Brunswick and Saskatchewan, pickup was negligible, whereas in British Columbia and Quebec, pickup was found in over half the distribution systems.[18]

Recent data from Ontario have corroborated these findings, with zinc in water withdrawn after an overnight stand sometimes reaching levels 100 times greater than that of the treated water. Thus, in Gananoque on the St. Lawrence River, the concentration of zinc after treatment was less than 0.01 mg/L in 1986, whereas the mean concentration at seven stations after an overnight stand was 0.309 mg/L (range: 0.03 to 1.17 mg/L). Water sampled after a five-minute flush had a mean zinc concentration of 0.014 mg/L.[15]

Because of the nutritional value of zinc, several studies have been undertaken to determine the zinc content of foods and total diets. Two surveys have been carried out to establish the zinc content of representative Canadian diets. These showed that meat, fish, poultry, cereals, oils, and fats have the highest zinc content, with meat, fish, and poultry contributing most to the daily dietary intake.[19,20]

Canadian Exposure

The average daily intake from a "representative Canadian diet" has been estimated to be between 15.2 and 19.9 mg.[19,20] The average daily intake for a "normal" man was reported to be 12 mg,[7] whereas other estimates of the normal daily intake range from 13.0 to 16.1 mg.[21]

Based on a 1981 national survey of trace metals in drinking water supplies, it was estimated that the average daily intake of zinc from drinking water for Canadian adults is ≤13.0 µg/day.[18] Based on a 1984 study, this value ranged from 33.8 to 97.5 µg/day and was found to be highly dependent on the sampling strategy.[22]

If the average concentration of zinc in air in Canada is assumed to be 0.035 $\mu g/m^3$ and the daily respiratory volume 20 m^3, then the daily intake from air would be 0.7 µg.

Based on the above considerations, the total daily intake of zinc from food, air, and water is estimated to be about 16 mg, with food contributing over 99 percent of the intake.

Health Considerations

Essentiality

Zinc is an essential element for all living things, including man. Zinc-containing proteins and enzymes are involved in every aspect of metabolism, including the replication and translation of genetic material.[23] Nearly 200 zinc-containing enzymes have been identified from all species.[24] A few of the well-characterized zinc-containing enzymes are carbonic anhydrase, aspartase, transcarbamylase, and alcohol dehydrogenase.

The Recommended Dietary Intake (RDI) for Canadians is 2 mg/day for young infants, 3 to 7 mg/day for children to age 12, and, from the age of 13, 9 mg/day for males and 8 mg/day for females.[25] The United States Recommended Daily Allowance (RDA) is 15 mg/day for adults.[26]

Zinc deficiency is most often found in countries where the primary source of protein is cereal grains. Zinc absorption from these grains may be limited by high phosphate and phytate content.[27] Zinc deficiency, however, has also been identified in some children in the United States.[28] Zinc deficiency is most likely to

occur in segments of the population with high zinc requirements, such as infants, adolescents, and pregnant women.[29]

General symptoms of zinc deficiency in humans include retarded growth, hypogonadism, anorexia, mental lethargy, skin changes, and night blindness.[27] Zinc deficiency may also impair the immune system,[30–32] slow wound healing,[27,33] and lead to eczema[34] and acne.[35,36] The importance of zinc in brain development and function has also been emphasized.[37] Recently it was reported that hyperactive children showed some degree of zinc deficiency.[38]

Absorption

In humans, zinc is absorbed in the small intestine by a carrier-mediated mechanism.[39] The fraction of zinc absorbed is difficult to determine because zinc is also secreted into the gut. Generally, 33 percent is accepted as the average zinc absorption in humans,[25,40,41] although zinc may be more bioavailable from drinking water than from food.[42] Zinc absorption increases with increasing dietary zinc up to a maximum rate, indicating a saturated carrier-mediated mechanism.[43] In addition, zinc status may influence zinc absorption. Zinc-deprived humans absorb this element with increased efficiency, whereas humans on a high-zinc diet show a reduced efficiency of absorption.

Almost 20 regulatory and dietary factors have been reported to influence zinc absorption,[39] one of the most important of which is phytate (myoinositol hexaphosphate).[44] The bioavailability of zinc from cereals and legumes is greatly reduced by the phytate content of these foods,[40,45] although some components of dietary fibre may also reduce zinc absorption.[46,47] Phytate, particularly when ingested with calcium,[48] reduces zinc absorption by forming insoluble precipitates.

At high doses, zinc and iron appear to antagonize each others' absorption.[49,50] In addition, excessive levels of both tin and copper in the diet may reduce zinc absorption.[51–54]

Distribution

Zinc absorbed from the intestine is carried to the liver bound to albumin.[55] Within the circulatory system, between 80 and 90 percent of the zinc found in whole blood is in the erythrocytes,[56] where it is largely bound to carbonic anhydrase.[49] The remaining plasma zinc is primarily bound to albumin, although other proteins and free amino acids also bind zinc.[57] Only a small fraction of plasma zinc is in the ionic form.

The body tissues high in zinc include bone, liver, kidney, pancreas, retina, and prostate.[58,59] Redistribution of zinc can occur under stress.[60]

Excretion

Zinc is primarily excreted via the gastrointestinal tract; zinc excreted in this way consists of unabsorbed dietary zinc, endogenous zinc secreted into the gastrointestinal tract, and zinc from mucosal cell desquamation.[61] Excretory mechanisms contribute to zinc homeostasis; however, regulation of zinc absorption is the major homeostatic mechanism. Under normal circumstances, about 0.5 mg of zinc may be lost in perspiration,[62] and about an equal amount is lost in daily urine. Although the kidney nephrons appear capable of secreting and reabsorbing zinc, urinary zinc does not appear to fluctuate with diet.[63] High-protein diets, however, are reported to increase urinary zinc.[64]

Toxicity

Toxicity from dietary zinc has not been reported, although occupational exposure[65] or pharmacological interventions[66] can produce symptoms. There have been reports of teratogenic effects in sheep[67] and disrupted cholesterol metabolism in man,[68,69] both thought to be due to the adverse effects of high zinc concentrations on copper metabolism. The copper status of individuals consuming high-zinc diets, therefore, should be monitored. The immune response in humans is reported to be impaired by excessive zinc intake.[70]

Other Considerations

Taste threshold tests have shown that 5 percent of the population can taste zinc at about 5 mg/L.[71] At a concentration of 40 mg/L, zinc gives water a milky appearance.[72]

Rationale

1. Zinc is an essential element for human nutrition. The daily requirement is between 4 and 10 mg depending on age and sex, but pregnant women and new mothers may require up to 16 mg/day. Food constitutes the most important source of zinc. Long-term ingestion of quantities considerably in excess of these amounts has not resulted in adverse effects. Furthermore, because of efficient homeostatic control mechanisms, the occurrence of chronic zinc toxicity is extremely unlikely. A maximum acceptable concentration (MAC) for zinc in drinking water has therefore not been set.

2. Although surface waters seldom have zinc concentrations greater than 0.1 mg/L, levels in tap water can be considerably higher because of the use of zinc in plumbing materials. Water containing zinc at concentrations in excess of 5.0 mg/L has an undesirable astringent taste and may be opalescent and develop a greasy film on boiling.

3. The aesthetic objective for zinc in drinking water is therefore ≤5.0 mg/L.

References

1. Browing, E. Toxicity of industrial metals. 2nd edition. Butterworths, London. p. 348 (1969).

2. U.S. Environmental Protection Agency. Quality criteria for water. Washington, DC. p. 481 (1976).

3. Hem, J.K. Zinc. In: Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Geological Survey Water Supply Paper No. 1473, Washington, DC. p. 125 (1970).

4. Gauvin, M.J. Zinc. In: Canadian minerals yearbook. Mineral Resources Branch, Department of Energy, Mines and Resources (1985).

5. Environment Canada. National inventory of sources and emissions of zinc (1972). Internal Report APCD 76-1, Air Pollution Control Directorate, June (1976).

6. Taylor, M.C. and Demayo, A. Zinc. In: Guidelines for surface water quality. Vol. 1. Inorganic chemical substances. Inland Waters Directorate, Water Quality Branch, Environment Canada, Ottawa (1980).

7. Warren, H.V. Some trace element concentrations in various environments. In: Environmental medicine. G.M. Howe and J.A. Loraine (eds.). William Heinemann Medical Books Ltd., London. p. 9 (1973).

8. Van Loon, J.C. Toronto's precipitation analysed for heavy metal content. Water Pollut. Control, 111: 38 (1973).

9. Klemm, R.F. and Gray, J.M.L. A study of the chemical composition of particulate matter and aerosols over Edmonton. Report RMD 82/9, prepared for the Research Management Division by the Alberta Research Council. p. 125 (1982).

10. Chan, W.H., Tang, A.J.S., Chung, D.H.S. and Lusis, M.A. Concentrations and deposition of trace metals in Ontario — 1982. Water Air Soil Pollut., 29: 373 (1986).

11. Beamish, R.J. and Van Loon, J.C. Precipitation loading of acid and heavy metals to a small acid lake near Sudbury, Ontario. J. Fish. Res. Board Can., 34: 649 (1977).

12. Lazrus, A.L., Lorange, E. and Lodge, J.P. Lead and other metal ions in United States precipitation. Environ. Sci. Technol., 4: 55 (1970).

13. Presant, E.W. and Tupper, W.M. Trace elements in some New Brunswick soils. Can. J. Soil Sci. 45: 305 (1965).

14. National Water Quality Data Bank (NAQUADAT). Water Quality Branch, Inland Waters Directorate, Environment Canada, Ottawa (1985).

15. Ontario Ministry of the Environment. Survey of water quality in the distribution systems, Ontario 1981–1986. Unpublished data (1987).

16. Environment Canada. Detailed surface water quality data, Northwest Territories 1980–1981, Alberta 1980–1981, Saskatchewan 1980–1981, Manitoba 1980–1981. Inland Waters Directorate (1984).

17. National Academy of Sciences. Water quality criteria. Vol. 93. Washington, DC (1972).

18. Méranger, J.C., Subramanian, K.S. and Chalifoux, C. Metals and other elements. Int. J. Assoc. Anal. Chem., 64: 44 (1981).

19. Kirkpatrick, D.C. and Coffin, D.E. The trace metal content of representative Canadian diets in 1970 and 1971. J. Inst. Can. Sci. Technol. Aliment., 7: 56 (1974).

20. Méranger, J.C. and Smith, D.C. The heavy metal content of a typical Canadian diet. Can. J. Public Health, 62: 53 (1972).

21. Hamilton, E.I. Relations between metal elements in man's diet and environmental factors. Trace Subst. Environ. Health, 13: 3 (1979).

22. Méranger, J.C., Subramanian, K.S., Langford, C.H. and Umbrasas, R. Use of an on-site integrated pump sampler for estimation of total daily intake of some metals from tap water. Int. J. Environ. Anal. Chem., 17: 307 (1984).

23. Galdes, A. and Vallee, B.L. Categories of zinc metalloenzymes. Metal Ions Biol. Syst., 15: 2 (1983).

24. O'Dell, B.L. History and status of zinc in nutrition. Fed. Proc., 43: 2821 (1984).

25. Department of National Health and Welfare. Recommended nutrient intakes for Canadians. Ottawa (1983).

26. National Academy of Sciences. Recommended daily allowances. 8th edition. Washington, DC (1974).

27. Prasad, A.S. Clinical biochemical and nutritional spectrum of zinc deficiency in human subjects: an update. Nutr. Rev., 41: 197 (1983).

28. Hambridge, K.M. and Walravens, P.A. In: Trace elements in human health and disease. Vol. 1. A.S. Prasad (ed.). Academic Press, New York, NY. p. 21 (1976).

29. Pleban, P.A., Numerof, B.S. and Wirth, F.H. Trace element metabolism in the fetus and neonate. Clin. Endocrinol. Metab., 14: 545 (1985).

30. Fraker, P.S., Haas, S.M. and Luecke, R.W. Effect of zinc deficiency on the immune response of young adult A/J mouse. J. Nutr., 107: 1889 (1977).

31. De Pasquale-Jardieu, P. and Fraker, P.J. Interference in the development of a secondary immune response in mice by zinc deprivation: persistence of effects. J. Nutr., 114: 1762 (1984).

32. Baer, M.T., King, J.C., Tamura, T., Morgen, S., Bradfield, R.B., Weston, W.L. and Daugherty, N.A. Nitrogen utilization, enzyme activity, glucose intolerance and leukocyte chemotaxis in human zinc depletion. Am. J. Clin. Nutr., 41: 1220 (1985).

33. Senapati, A. and Thompson, R.P.H. Zinc deficiency and the prolonged accumulation of zinc in wounds. Br. J. Surg., 72: 583 (1985).

34. David, T.J., Wells, F.E., Sharpe, T.C. and Gibbs, A.C.C. Low serum zinc in children with atopic eczema. Br. J. Dermatol., 111: 597 (1984).

35. Fritzherbert, J.C. Acne vulgaris — zinc deficiency? Med. J. Aust., 1: 848 (1976).

36. Pohit, J., Saha, K.C. and Pal, B. Zinc status of acne vulgaris patients. J. Appl. Nutr., 37: 18 (1985).

37. Sandstead, H.H. Zinc: essential for brain development and function. Nutr. Rev., 43: 129 (1985).

38. Barlow, P.J. and Sidani, S.A. Metal imbalance and hyperactivity Acta Pharmacol. Toxicol., 59: 458 (1986).

39. Cousins, R.J. Absorption, transport and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionine and ceruloplasmin. Physiol. Rev., 65: 238 (1985).

40. Turnlund, J.R., King, J.C., Keyes, W.R., Gong, B. and Michel, M.C. A stable isotope study of zinc absorption in young men: effects of phytate and a-cellulose. Am. J. Clin. Nutr., 40: 1071 (1984).

41. Honstead, J.F. and Brady, D.N. The uptake and retention of ^{32}P and ^{65}Zn from the consumption of Columbia River fish. Health Phys., 13: 455 (1967).

42. Van Barneveld, A.A. and Van Den Hamer, C.J.A. Influence of isotope administration mode and of food consumption on absorption and retention of ^{65}Zn in mice. Trace Subst. Environ. Health, 16: 196 (1983).

43. Steel, L. and Cousins, R.J. Kinetics of zinc absorption by luminally and vascularly perfused rat intestine. Am. J. Physiol., 248: G46 (1985).

44. House, W.A., Welch, R.M. and Van Campen, D.R. Effect of phytic acid on the absorption, distribution and endogenous excretions of zinc in rats. J. Nutr., 112: 941 (1982).

45. O'Dell, B.L. and Savage, J.E. Effect of phytate on zinc availability. Proc. Soc. Exp. Biol. Med., 103: 304 (1960).

46. Reinhold, J.G., Faradji, B., Abade, P. and Ismail-Beigi, F. Decreased absorption of calcium, magnesium, zinc and phosphorus by humans due to increased fiber and phosphorus consumption as wheat bread. J. Nutr., 106: 493 (1976).

47. Kelsay, J.L., Jacob, R.A. and Prather, E.S. Effect of fiber from fruits and vegetables on metabolic responses of human subjects: III — Zinc, copper and phosphorus balances. Am. J. Clin. Nutr., 32: 2307 (1979).

48. Sandstead, J.J., Dintzis, F. and Johnson, L. Influence of diet fiber, phytate and calcium on human zinc absorption. Fed. Proc., 43: 851 (1984).

49. Crofton, R.W., Gvozdanociv, D. and Agget, P.J. A study of the effect of zinc on iron absorption in Man. Proc. Nutr. Soc., 41: 17 (abstr.) (1962).

50. Solomons, N.W. and Jacob, R.A. Studies on the bioavailability of zinc in humans: effect of heme and non-heme iron on absorption of zinc. Am. J. Clin. Nutr., 34: 475 (1981).

51. Valberg, L.S., Flanagan, P.R. and Chamberlain, M.J. Effects of iron, tin and copper on zinc absorption in humans. Am. J. Clin. Nutr., 40: 536 (1984).

52. Johnson, M.A., Baier, J.M. and Greger, J.L. Effect of dietary tin on zinc, copper, iron, manganese and magnesium metabolism of adult males. Am. J. Clin. Nutr., 35: 1332 (1982).

53. Van Campen, D.R. Copper interference with the intestinal absorption of zinc-65 by rats. J. Nutr., 97: 104 (1969).

54. Van Campen, D.R. and Scaife, P.U. Zinc interference with coffee absorption in rats. J. Nutr., 91: 473 (1967).

55. Smith, K.T., Failla, M.L. and Cousins, R.J. Identification of albumin as the plasma carriers for zinc absorption by perfused rat intestine. Biochem. J., 184: 627 (1979).

56. Scott, K.T. and Bradwell, A.R. Identification of the serum binding proteins for iron, zinc, cadmium, nickel and calcium. Clin. Chem., 29: 629 (1983).

57. Vallee, B.L., Lewis, H.D., Attschule, M.P. and Gibson, J.G. The relationship between carbonic anhydrase activity and zinc content of erythrocytes in normal, in anemic and other pathological conditions. Blood, 4: 467 (1949).

58. Underwood, E.J. In: Trace elements in human and animal nutrition. 4th edition. E. Underwood (ed.). Academic Press, New York, NY. p. 196 (1977).

59. Halsted, J.A., Smith, J.C. and Irwin, M.I. Conspectus of research on zinc requirements of man. J. Nutr., 104: 345 (1974).

60. Beisel, W.R., Pekarek, R.S. and Wannemacher, R.W., Jr. In: Trace elements in human health and disease. Vol. 1. A.S. Prasad (ed.). Academic Press, New York, NY. p. 87 (1976).

61. Kirchgessner, M. and Weigand, E. Zinc absorption and excretion in nutrition. Metal Ions Biol. Syst., 15: 319 (1983).

62. Prasad, A.S. Clinical, biochemical and nutritional spectrum of zinc deficiency in human subjects: an update. Nutr. Rev., 41: 197 (1983).

63. Abu-Hamdan, D.K., Migdal, S.O., Whitehorse, R., Rabbani, P., Prasad, A.S. and McDonald, F.D. Renal handling of zinc: effect of cysteine infusion. Am. J. Physiol., 241(F): 487 (1981).

64. Greger, J.L. and Snedeker, S.M. Effect of dietary protein and phosphorus levels on the utilization of zinc, copper and manganese by adult males. J. Nutr., 110: 243 (1980).

65. Papp, J.P. Metal fume fever. Postgrad. Med., 43: 160 (1968).

66. Prasad, A.S., Brewer, G.J., Schoomaker, E.B. and Rabbani, P. Hypocupremia induced by zinc therapy in adults. J. Am. Med. Assoc., 240: 2166 (1978).

67. Campbell, J.K. and Mills, C.F. Toxicity of zinc to pregnant sheep. Environ. Res., 20: 1 (1979).

68. Klevay, L.M. Interactions of copper and zinc in cardiovascular disease. Ann. N.Y. Acad. Sci., 355: 140 (1980).

69. Katya-Katya, M., Ensminger, A., Mejean, L. and Derley, G. The effect of zinc supplementation on plasma cholesterol levels. Nutr. Res., 4: 663 (1984).

70. Chandra, R.K. Excessive intake of zinc impairs immune responses. J. Am. Med. Assoc., 252: 1443 (1984).

71. Cohen, J.M., Kamphake, L.J., Harris, E.K. and Woodward, R.L. Taste threshold concentrations of metals in drinking water. J. Am. Water Works Assoc., 52: 660 (1960).

72. Anderson, E., Reinhard, C. and Hammel, W. The corrosion of zinc in various waters. J. Am. Water Works Assoc., 26: 49 (1934).

Le zinc

L'objectif de qualité esthétique pour le zinc est *≤5,0 mg/L*. Le zinc est un élément essentiel qui n'est généralement pas considéré comme toxique. L'apport alimentaire de zinc suffit amplement à satisfaire l'apport quotidien recommandé. Du point de vue nutritionnel, l'eau potable n'est pas considérée comme une source importante de cet élément. L'eau renfermant des teneurs en zinc supérieures à 5,0 mg/L a tendance à être opalescente, à laisser une pellicule graisseuse après ébullition et à prendre un goût indésirable à cause de son astringence.

Généralités

Le zinc est un élément abondant qui constitue à peu près 0,004 pour cent de la croûte terrestre.[1] La forme minérale la plus commune du zinc est la sphalérite (ZnS), qui est souvent associée aux sulfures de certains autres éléments métalliques tels que le plomb, le cuivre, le cadmium et le fer.[2] Le zinc se rencontre aussi sous forme de calamine ($ZnCO_3$) dans les sédiments carbonatés; les autres formes du zinc sont habituellement des produits d'oxydation de la sphalérite.[2,3]

Les minerais et les concentrés produits au Canada au cours de 1984 renfermaient 1 207 098 tonnes de zinc; la consommation de zinc au pays s'élevait à 150 528 tonnes.[4] Les réserves de zinc que renferment les gisements canadiens connus ont été évaluées à 20 492 700 tonnes.[4] Au Canada, le zinc sert surtout à la galvanisation du fer et de l'acier; représentant en 1984, 40 pour cent de la consommation de zinc. Une autre tranche de 20 pour cent était destinée à la production d'accessoires de plomberie et de chauffage en laiton, alors qu'une proportion de 15 pour cent servait, dans l'industrie du moulage en coquille, à produire des pièces de quincaillerie utilisées en construction ainsi que des accessoires d'automobiles.[5] La consommation restante de zinc est répartie entre un grand nombre d'industries. L'oxyde de zinc sert à la fabrication de peinture, de caoutchouc, de rayonne, de fils, d'encres, d'allumettes et de produits chimiques; la «poussière» de zinc est utilisée en imprimerie ou pour teindre les tissus, purifier les graisses, ou cémenter les métaux dans des procédés métallurgiques; le zinc laminé est utilisé dans les pièces ornementales et les batteries; finalement, des sels de zinc servent à la préparation d'agents de conservation du bois et de pesticides.

Présence dans l'environnement

Les émissions industrielles et domestiques contribuent beaucoup à la quantité de zinc présente dans l'environnement tant aquatique qu'atmosphérique. Durant l'année 1972, la production primaire de fer et d'acier fut responsable de l'émission de 2 690 tonnes de zinc (sous forme d'oxyde de zinc) dans l'atmosphère canadienne. Les quantités émises par la production primaire de cuivre et de zinc étaient semblables (2 290 tonnes). L'ensemble des émissions industrielles de zinc s'élevait à 6 340 tonnes. La combustion de carburant (charbon et huiles lourdes) dans un appareil fixe y ajoutait encore 134 tonnes. Les transports, l'incinération de déchets solides et l'épandage de pesticides étaient respectivement responsables de l'émission de 794, de 124 et de 1,8 tonnes de ce métal. L'ensemble des émissions de toute origine s'élevait en 1972 à 7 400 tonnes.[5]

D'après des évaluations faites après une étude réalisée en 1980, la contribution respective des sources naturelles et anthropiques de zinc dans l'environnement s'élevait cette année-là à 768 000 et à 414 000 tonnes.[6]

Le dosage du zinc dans les matières particulaires en suspension dans l'air au-dessus des régions urbaines a montré l'existence de concentrations variant entre 0,32 mg/g à Toronto à 5,40 mg/g à Vancouver.[7] Dans les poussières, le long des quais de Toronto, les teneurs atteignaient même 6 mg/g.[8]

Le dosage des matières particulaires totales en suspension dans l'air au-dessus d'Edmonton durant 1978 et 1979 a laissé voir une concentration moyenne de 0,085 $\mu g/m^3$ qui variait peu avec la saison. Dans un cas, en novembre 1978, cette concentration atteignait 0,6 $\mu g/m^3$, peut-être à cause d'émissions fugitives venant des incinérateurs.[9]

Une étude réalisée en 1982 dans l'ensemble de l'Ontario portait sur le contrôle des métaux (y compris le zinc) sous forme de traces dans l'air et les précipitations, de façon à en établir la distribution spatiale.[10] La concentration atmosphérique moyenne de zinc variait de 0,019 $\mu g/m^3$ dans le sud à 0,007 $\mu g/m^3$ dans le nord.

De façon similaire, les retombées sèches annuelles de zinc allaient de 1,51 µg/m^2 dans le sud à 0,51 µg/m^2 dans le nord. La concentration moyenne de zinc dans les précipitations annuelles passait de 0,0083 mg/L dans le sud à 0,0055 mg/L dans le nord.[8] Les concentrations de métaux sous forme de traces dans l'ensemble de l'Ontario avaient généralement tendance à diminuer dans la direction sud-nord. La quantité de zinc trouvée dans les précipitations est un indice de la présence ou de l'absence d'installations dont l'exploitation entraîne l'émission de zinc. Près de Sudbury en Ontario, la concentration moyenne de zinc dans les précipitations était de 0,028 mg/L en 1972–1973; toutefois, une pointe de 120 mg/L fut atteinte au cours d'une précipitation.[11] Aux États-Unis, la concentration moyenne de zinc dans les pluies était de 0,107 mg/L.[12]

Dans des échantillons de neige non polluée prélevés dans une région éloignée du nord du Manitoba, les concentrations de zinc étaient inférieures à 0,001 mg/L.[11]

La concentration moyenne de zinc dans le sol est de 90 mg/kg au Canada.[7] Une valeur analogue a été trouvée dans des sols du Nouveau-Brunswick ne renfermant pas de minerais sulfurés.[13] Dans des sols représentatifs d'endroits industrialisés du Canada, la teneur en zinc variait de 106 à 2 095 mg/kg (la valeur maximale ayant été observée à Toronto).[8] Des échantillons de sols urbains recueillis à Vancouver et à Toronto renfermaient des teneurs respectives en zinc de 395 et de 220 mg/kg.[7]

Les carbonates, les oxydes et les sulfures de zinc sont peu solubles dans l'eau; par conséquent, les concentrations de zinc présentes dans les eaux naturelles sont faibles. Les chlorures et les sulfates, qui sont très solubles, y sont hydrolysés en hydroxydes et en carbonates. Les teneurs en zinc dissous sont encore diminuées par adsorption sur les hydrolysats sédimentaires.[3]

Au cours de la période allant de 1980 à 1985, la concentration de zinc des eaux de surface canadiennes variait de 0,001 mg/L à un maximum de 1,17 mg/L.[14] L'analyse des eaux de plusieurs lacs de l'Ontario (servant à l'approvisionnement en eau potable) a révélé qu'elles avaient une teneur moyenne en zinc inférieure à 0,010 mg/L.[15]

Une étude des eaux fluviales du centre et de l'ouest du Canada a révélé que les teneurs en zinc variaient fortement, aussi bien selon l'endroit que selon la saison. La plage de cette variation allait de 0,001 à 0,096 mg/L, les teneurs maximales ayant été observées dans la rivière des Esclaves dans les Territoires du Nord-Ouest; normalement, les concentrations présentes dans les eaux fluviales ne dépassent pas 0,04 mg/L.[16]

L'eau du robinet peut renfermer des concentrations de zinc beaucoup plus élevées que les eaux de surface par suite de la lixiviation du zinc dans les tuyaux galvanisés, les réservoirs à eau chaude et les garnitures en laiton.[17]

Une enquête réalisée dans l'ensemble du pays sur les réseaux de distribution en eau potable a permis de trouver que la teneur moyenne en zinc des échantillons d'eau brute, d'eau traitée et d'eau distribuée dépassait rarement 0,01 mg/L. Toutefois, l'accumulation de zinc dans l'eau était fréquente pendant sa circulation dans les réseaux de distribution. Au Nouveau-Brunswick et en Saskatchewan, ce phénomène était négligeable; par contre, en Colombie-Britannique et au Québec, on notait que plus de la moitié des réseaux de distribution favorisaient l'accumulation de zinc.[18]

Des données récentes recueillies en Ontario sont venues corroborer ces observations. En effet, la première eau tirée du robinet après avoir séjourné dans les conduites pendant la nuit renfermait des teneurs en zinc qui étaient parfois 100 fois supérieures à celles de l'eau traitée. Ainsi, à Gananoque sur le fleuve Saint- Laurent, les eaux traitées avaient une concentration en zinc inférieure à 0,01 mg/L en 1986, alors que leur teneur moyenne après stagnation pendant la nuit était 0,309 mg/L (plage de 0,03 à 1,17 mg/L) à sept postes d'échantillonnage. Après que l'eau eut coulé pendant cinq minutes, les échantillons avaient une teneur moyenne en zinc de 0,014 mg/L.[15]

Étant donné la valeur nutritive de cet élément, plusieurs études ont été entreprises afin de déterminer la teneur en zinc de certains aliments et de régimes alimentaires complets. Deux études ont été réalisées dans le but de trouver la teneur en zinc de régimes alimentaires typiques du Canada. D'après ces études, la viande, le poisson, la volaille, les céréales, les huiles et les graisses possèdent les teneurs les plus élevées; de plus, ce sont la viande, le poisson et la volaille qui contribuent le plus à l'apport alimentaire quotidien.[19,20]

Exposition des Canadiens

On estime que l'apport quotidien moyen d'un «régime alimentaire canadien représentatif» varie de 15,2 à 19,9 mg.[19,20] L'apport quotidien moyen signalé pour un homme «normal» est de 12 mg;[7] alors que d'autres estiment que l'apport quotidien normal varie de 13,0 à 16,1 mg.[21]

D'après une étude portant sur les métaux présents sous forme de traces dans les réseaux de distribution d'eau potable, qui a été réalisée à l'échelle nationale en 1981, l'apport quotidien moyen de zinc d'un Canadien adulte provenant de l'eau potable a été évalué à ≤13,0 µg/jour.[18] Par contre, au cours d'une étude effectuée en 1984, cette valeur variait de 33,8 à 97,5 µg/jour, mais on a trouvé qu'elle dépendait fortement de la méthode d'échantillonnage.[22]

Si l'on suppose que la concentration atmosphérique de zinc au Canada est, en moyenne, de 0,035 µg/m^3 et

que le volume respiratoire quotidien est de 20 m^3, l'apport quotidien provenant de l'atmosphère serait de 0,7 µg.

Compte tenu de considérations exprimées ci-dessus, l'apport quotidien total de zinc tiré des aliments, de l'air et de l'eau potable est évalué à environ 16 mg, les aliments contribuant à plus de 99 pour cent de cet apport.

Effets sur la santé

Besoins essentiels

Le zinc est un élément essentiel pour tous les organismes vivants, y compris l'homme. Des protéines et des enzymes renfermant du zinc participent à tous les aspects du métabolisme, entre autres à la réplication et à la traduction du matériel génétique.[23] On a identifié près de 200 enzymes renfermant du zinc chez toutes les espèces.[24] Parmi les enzymes renfermant du zinc qui sont bien caractérisées, on peut citer l'anhydrase carbonique, l'aspartase, la transcarbamylase et l'alcool-déshydrogénase.

L'apport nutritionnel recommandé (ANR) pour les Canadiens est de 2 mg/jour pour les bébés, de 3 à 7 mg/jour pour les enfants jusqu'à l'âge de 12 ans et de 9 mg/jour pour les garçons et 8 mg/jour pour les filles à partir de 13 ans.[25] Aux États-Unis, l'apport quotidien recommandé (RDA) est de 15 mg/jour pour un adulte.[26]

Les carences en zinc s'observent le plus souvent dans des pays où les principales sources de protéines sont les céréales; en effet, l'absorption du zinc à partir de celles-ci peut être limitée par leur forte teneur en phosphates et en phytates.[27] Toutefois, aux États-Unis, on a aussi diagnostiqué des carences en zinc chez certains enfants.[28] C'est dans les segments de la population qui ont les plus grands besoins en zinc (p. ex., les bébés, les adolescents et les femmes enceintes) que la probabilité d'une carence en zinc est la plus élevée.[29]

Parmi les symptômes généraux indiquant une carence en zinc chez les humains, on peut citer le retard de croissance, l'hypogonadisme, l'anorexie, la léthargie, les modifications cutanées et la cécité nocturne.[27] Une carence en zinc peut aussi affaiblir le système immunitaire,[30–32] ralentir la guérison des blessures[27,33] et provoquer l'eczéma[34] et l'acné.[35,36] On a aussi insisté sur l'importance du zinc dans le développement et le fonctionnement du cerveau.[37] On a signalé récemment un certain degré de carence en zinc chez les enfants hyperactifs.[38]

Absorption

Chez les humains, le zinc est absorbé dans l'intestin grêle par un mécanisme à médiation par le vecteur.[39] La fraction de zinc absorbé est difficile à déterminer, car cet élément est aussi sécrété dans l'intestin. En général, on admet que l'absorption du zinc chez les humains est, en moyenne, de 33 pour cent,[25,40,41] bien que sa biodisponibilité puisse être plus grande à partir de l'eau potable que des aliments.[42] L'absorption de zinc augmente en fonction des apports alimentaires jusqu'à un taux maximal indiquant une médiation jusqu'à saturation des vecteurs responsables.[43] En outre, le bilan du zinc peut influer sur l'absorption de ce métal. Son efficacité d'absorption augmente chez les humains qui en sont privés, alors qu'elle diminue chez ceux qui ont une alimentation riche en zinc.

On a signalé quelque 20 facteurs qui influent, tant du point de vue régulation qu'alimentation, sur l'absorption du zinc[39] et dont l'un des plus importants est la teneur en phytates (hexaphosphate de myo-inositol).[44] La biodisponibilité du zinc des céréales et des légumineuses est fortement réduite par leur teneur en phytates,[40,45] bien que certaines composantes des fibres alimentaires puissent aussi réduire l'absorption du zinc.[46,47] L'ingestion de phytates, en particulier en présence de calcium,[48] réduit l'absorption du zinc par formation de précipités insolubles.

À fortes doses, il semble qu'il y ait antagonisme entre l'absorption du zinc et celle du fer.[49,50] De plus, la présence dans l'alimentation de teneurs trop grandes aussi bien en étain qu'en cuivre peut diminuer l'absorption du zinc.[51–54]

Répartition

Le zinc absorbé à partir de l'intestin se lie à l'albumine; il est ensuite transporté sous cette forme jusqu'au foie.[55] Dans l'appareil circulatoire, de 80 à 90 pour cent du zinc présent dans le sang entier se trouve dans les érythrocytes,[56] où il est largement fixé à l'anhydrase carbonique.[49] Le reste du zinc plasmatique est principalement lié à l'albumine, bien que le zinc soit aussi fixé par d'autres protéines et des acides aminés libres.[57] Une faible portion seulement du zinc plasmatique existe sous forme ionique.

Les tissus organiques ayant une forte teneur en zinc sont, entre autres, les os, le foie, les reins, le pancréas, la rétine et la prostate.[58,59] Le stress peut entraîner une nouvelle répartition du zinc.[60]

Excrétion

L'excrétion du zinc se fait principalement par le tube digestif sous forme de zinc alimentaire non absorbé, de zinc endogène sécrété dans le tube digestif et de zinc venant de la desquamation des cellules muqueuses.[61] Les mécanismes d'excrétion contribuent à l'homéostasie du zinc; toutefois, le principal mécanisme homéostatique est la régulation de l'absorption du zinc. Dans des circonstances normales, environ 0,5 mg de zinc peut être perdu chaque jour par la sueur[62] de même que dans les urines. Bien que les

néphrons semblent capables de sécréter et de réabsorber le zinc, la teneur des urines en cet élément ne semble pas fluctuer en fonction de l'alimentation.[63] On a cependant signalé que des régimes à forte teneur en protéines provoquaient une augmentation du zinc urinaire.[64]

Effets toxiques

Aucune toxicité n'a été signalée pour le zinc d'origine alimentaire, bien que l'exposition professionnelle[65] ou les interventions pharmacologiques[66] puissent produire des symptômes. Des effets tératogènes ont été signalés chez le mouton[67] ainsi qu'une rupture du métabolisme du cholestérol chez l'homme;[68,69] ces deux manifestations seraient attribuables aux effets nocifs de fortes concentrations de zinc sur le métabolisme du cuivre. Le bilan du cuivre devrait donc être surveillé chez les personnes ayant une alimentation riche en zinc. On a signalé que les réactions immunitaires seraient altérées chez l'homme par l'absorption de trop grandes quantités de zinc.[70]

Autres considérations

Des essais visant à déterminer le seuil gustatif ont montré que 5 pour cent de la population peut déceler au goût une concentration de zinc d'environ 5 mg/L.[71] Lorsque sa concentration atteint 40 mg/L, le zinc donne à l'eau un aspect laiteux.[72]

Justification

1. Le zinc est un élément nutritif essentiel pour l'homme. Les besoins quotidiens varient de 4 à 10 mg selon l'âge et le sexe; toutefois, les femmes enceintes et celles qui viennent d'accoucher peuvent avoir besoin d'une dose de 16 mg/jour. Les aliments constituent la source la plus importante de zinc. L'ingestion de longue durée de quantités dépassant considérablement celles mentionnées n'a entraîné aucun effet nocif. Qui plus est, à cause de la présence de mécanismes d'homéostasie efficaces, il est très peu probable que le zinc puisse engendrer une toxicité chronique. En conséquence, on n'a fixé aucune concentration maximale acceptable pour le zinc dans l'eau potable.

2. Bien que les eaux de surface renferment rarement des concentrations de zinc supérieures à 0,1 mg/L, l'eau du robinet peut renfermer une teneur beaucoup plus élevée à cause de l'utilisation du zinc en plomberie. L'eau contenant des concentrations de zinc supérieures à 5,0 mg/L prend un goût indésirable à cause de son astringence et peut devenir opalescente et former une pellicule graisseuse après ébullition.

3. L'objectif de qualité esthétique pour le zinc dans l'eau potable est donc ≤5,0 mg/L.

Références bibliographiques

1. Browing, E. Toxicity of industrial metals. 2e édition. Butterworths, Londres. p. 348 (1969).

2. U.S. Environmental Protection Agency. Quality criteria for water. Washington, DC. p. 481 (1976).

3. Hem, J.K. Zinc. Dans : Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Geological Survey Water Supply, renvoi N° 1437, Washington, DC. p. 125 (1970).

4. Gauvin, M.J. Zinc. Dans : L'Annuaire des minéraux du Canada. Direction des ressources minérales, ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources (1985).

5. Environnement Canada. National inventory of sources and emissions of zinc (1972). Rapport interne de la DGAA 76-1, Direction générale de l'assainissement de l'air, juin (1976).

6. Taylor, M.C. et Demayo, A. Le zinc. Dans : Lignes directrices concernant la qualité des eaux de surface. Vol. 1. Les substances chimiques inorganiques. Direction générale des eaux intérieures, Direction de la qualité des eaux, Environnement Canada, Ottawa (1980).

7. Warren, H.V. Some trace element concentrations in various environments. Dans : Environmental medicine. G.M. Howe et J.A. Loraine (éditeurs). William Heinemann Medical Books Ltd., Londres. p. 9 (1973).

8. Van Loon, J.C. Toronto's precipitation analysed for heavy metal content. Water Pollut. Control, 111: 38 (1973).

9. Klemm, R.F. et Gray, J.M.L. A study of the chemical composition of particulate matter and aerosols over Edmonton. Rapport RMD 82/9, préparé pour la Research Management Division par l'Alberta Research Council. p. 125 (1982).

10. Chan, W.H., Tang, A.J.S., Chung, D.H.S. et Lusis, M.A. Concentrations and deposition of trace metals in Ontario — 1982. Water Air Soil Pollut., 29: 373 (1986).

11. Beamish, R.J. et Van Loon, J.C. Precipitation loading of acid and heavy metals to a small acid lake near Sudbury, Ontario. J. Fish. Res. Board Can., 34: 649 (1977).

12. Lazrus, A.L., Lorange, E. et Lodge, J.P. Lead and other metal ions in United States precipitation. Environ. Sci. Technol., 4: 55 (1970).

13. Presant, E.W. et Tupper, W.M. Trace elements in some New Brunswick soils. Can. J. Soil Sci. 45: 305 (1965).

14. Banque nationale de données sur la qualité des eaux (NAQUADAT). Direction de la qualité des eaux, Direction générale de la qualité des eaux intérieures, Environnement Canada, Ottawa (1985).

15. Ministère de l'Environnement de l'Ontario. Survey of water quality in the distribution systems, Ontario 1981–1986. Données non publiées (1987).

16. Environnement Canada. Detailed surface water quality data, Northwest Territories 1980–1981, Alberta 1980–1981, Saskatchewan 1980–1981, Manitoba 1980–1981. Direction générale des eaux intérieures (1984).

17. National Academy of Sciences. Water quality criteria. Vol. 93. Washington, DC (1972).

18. Méranger, J.C., Subramanian, K.S. et Chalifoux, C. Metals and other elements. Int. J. Assoc. Anal. Chem., 64: 44 (1981).

19. Kirkpatrick, D.C. et Coffin, D.E. The trace metal content of representative Canadian diets in 1970 and 1971. J. Inst. Can. Sci. Technol. Aliment., 7: 56 (1974).

20. Méranger, J.C. et Smith, D.C. The heavy metal content of a typical Canadian diet. Can. J. Public Health, 62: 53 (1972).

21. Hamilton, E.I. Relations between metal elements in man's diet and environmental factors. Trace Subst. Environ. Health, 13: 3 (1979).

22. Méranger, J.C., Subramanian, K.S., Langford, C.H. et Umbrasas, R. Use of an on-site integrated pump sampler for estimation of total daily intake of some metals from tap water. Int. J. Environ. Anal. Chem., 17: 307 (1984).

23. Galdes, A. et Vallée, B.L. Categories of zinc metalloenzymes. Metal Ions Biol. Syst., 15: 2 (1983).

24. O'Dell, B.L. History and status of zinc in nutrition. Fed. Proc., 43: 2821 (1984).

25. Ministère de la Santé nationale et du Bien-être social. Apports nutritionnels recommandés pour les Canadiens. Ottawa (1983).

26. National Academy of Sciences. Recommended daily allowances. 8e édition. Washington, DC (1974).

27. Prasad, A.S. Clinical biochemical and nutritional spectrum of zinc deficiency in human subjects: an update. Nutr. Rev., 41: 197 (1983).

28. Hambridge, K.M. et Walrauens, P.A. Dans : Trace elements in human health and disease. Vol. 1. A.S. Prasard (éditeur). Academic Press, New York, NY. p. 21 (1976).

29. Pleban, P.A., Numerof, B.S. et Wirth, F.H. Trace element metabolism in the fetus and neonate. Clin. Endocrinol. Metab., 14: 545 (1985).

30. Fraker, P.S., Haas, S.M. et Luecke, R.W. Effect of zinc deficiency on the immune response of young adult A/J mouse. J. Nutr., 107: 1889 (1977).

31. De Pasquale-Jardieu, P. et Fraker, P.J. Interference in the development of a secondary immune response in mice by zinc deprivation: persistence of effects. J. Nutr., 114: 1762 (1984).

32. Baer, M.T., King, J.C., Tamura, T., Morgen, S., Bradfield, R.B., Weston, W.L. et Daugherty, N.A. Nitrogen utilization, enzyme activity, glucose intolerance and leukocyte chemotaxis in human zinc depletion. Am. J. Clin. Nutr., 41: 1220 (1985).

33. Senapati, A. et Thompson, R.P.H. Zinc deficiency and the prolonged accumulation of zinc in wounds. Br. J. Surg., 72: 583 (1985).

34. David, T.J., Wells, F.E., Sharpe, T.C. et Gibbs, A.C.C. Low serum zinc in children with atopic eczema. Br. J. Dermatol., 111: 597 (1984).

35. Fritzherbert, J.C. Acne vulgaris — zinc deficiency? Med. J. Aust., 1: 848 (1976).

36. Pohit, J., Saha, K.C. et Pal, B. Zinc status of acne vulgaris patients. J. Appl. Nutr., 37: 18 (1985).

37. Sandstead, H.H. Zinc: essential for brain development and function. Nutr. Rev., 43: 129 (1985).

38. Barlow, P.J. et Sidani, S.A. Metal imbalance and hyperactivity. Acta Pharmacol. Toxicol., 59: 458 (1986).

39. Cousins, R.J. Absorption, transport and hepatic metabolism of copper and zinc: special reference to metallothionine and ceruloplasmin. Physiol. Rev., 65: 238 (1985).

40. Turnland, J.R., King, J.C., Keyes, W.R., Gong, B. et Michel, M.C. A stable isotope study of zinc absorption in young men: effects of phytate and a-cellulose. Am. J. Clin. Nutr., 40: 1071 (1984).

41. Honstead, J.F. et Brady, D.N. The uptake and retention of ^{32}P and ^{65}Zn from the consumption of Columbia River fish. Health Phys., 13: 455 (1967).

42. Van Barneveld, A.A. et Van Den Hamer, C.J.A. Influence of isotope administration mode and of food consumption on absorption and retention of ^{65}Zn in mice. Trace Subst. Environ. Health, 16: 196 (1983).

43. Steel, L. et Cousins, R.J. Kinetics of zinc absorption by luminally and vascularly perfused rat intestine. Am. J. Physiol., 248: G46 (1985).

44. House, W.A., Welch, R.M. et Van Campen, D.R. Effect of phytic acid on the absorption, distribution and endogenous excretions of zinc in rats. J. Nutr., 112: 941 (1982).

45. O'Dell, B.L. et Savage, J.E. Effect of phytate on zinc availability. Proc. Soc. Exp. Biol. Med., 103: 304 (1960).

46. Reinhold, J.G., Faradji, B., Abadi, P. et Ismail-Beigi, F. Decreased absorption of calcium, magnesium, zinc and phosphorus by humans due to increased fiber and phosphorus consumption as wheat bread. J. Nutr., 106: 493 (1976).

47. Kelsay, J.L., Jacob, R.A. et Prather, E.S. Effect of fiber from fruits and vegetables on metabolic responses of human subjects: III — Zinc, copper and phosphorus balances. Am. J. Clin. Nutr., 32: 2307 (1979).

48. Sandstead, J.J., Dintzis, F. et Johnson, L. Influence of diet fiber, phytate and calcium on human zinc absorption. Fed. Proc., 43: 851 (1984).

49. Crofton, R.W., Gvozdanociv, D. et Agget, P.J. A study of the effect of zinc on iron absorption in Man. Proc. Nutr. Soc., 41: 17 (extr.) (1962).

50. Solomons, N.W. et Jacob, R.A. Studies on the bioavailability of zinc in humans: effect of heme and non-heme iron on absorption of zinc. Am. J. Clin. Nutr., 34: 475 (1981).

51. Valberg, L.S., Flanagan, P.R. et Chamberlain, M.J. Effects of iron, tin and copper on zinc absorption in humans. Am. J. Clin. Nutr., 40: 536 (1984).

52. Johnson, M.A., Baier, J.M. et Greger, J.L. Effect of dietary tin on zinc, copper, iron, manganese and magnesium metabolism of adult males. Am. J. Clin. Nutr., 35: 1332 (1982).

53. Van Campen, D.R. Copper interference with the intestinal absorption of zinc-65 by rats. J. Nutr., 97: 104 (1969).

54. Van Campen, D.R. et Scaife, P.U. Zinc interference with coffee absorption in rats. J. Nutr., 91: 473 (1967).

55. Smith, K.T., Failla, M.L. et Cousins, R.J. Identification of albumin as the plasma carriers for zinc absorption by perfused rat intestine. Biochem. J., 184: 627 (1979).

56. Scott, K.T. et Bradwell, A.R. Identification of the serum binding proteins for iron, zinc, cadmium, nickel and calcium. Clin. Chem., 29: 629 (1983).

57. Vallée, B.L., Lewis, H.D., Altschule, M.P. et Gibson, J.G. The relationship between carbonic anhydrase activity and zinc content of erythrocytes in normal, in anemic and other pathological conditions. Blood, 4: 467 (1949).

58. Underwood, E.J. Dans : Trace elements in human and animal nutrition. 4e édition. E. Underwood (éditeur). Academic Press, New York, NY. p. 196 (1977).

59. Halsted, J.A., Smith, J.C. et Irwin, M.I. Conspectus of research on zinc requirements of man. J. Nutr., 104: 345 (1974).

60. Beisel, W.R., Pekarek, R.S. et Wannemacher, R.W., Jr. Dans : Trace elements in human health and disease. Vol. 1. A.S. Prasad (éditeur). Academic Press, New York, NY. p. 87 (1976).

61. Kirchgessner, M. et Weigand, E. Zinc absorption and excretion in nutrition. Metal Ions Biol. Syst., 15: 319 (1983).

62. Frasad, A.S. Clinical, biochemical and nutritional spectrum of zinc deficiency in human subjects: an update. Nutr. Rev., 41: 197 (1983).

63. Abu-Hamdan, D.K., Migdal, S.O., Whitehorse, R., Rabbani, P., Prasad, A.S. et McDonald, F.D. Renal handling of zinc: effect of cysteine infusion. Am. J. Physiol., 241(F): 487 (1981).

64. Greger, J.L. et Snedeker, S.M. Effect of dietary protein and phosphorus levels on the utilization of zinc, copper and manganese by adult males. J. Nutr., 110: 243 (1980).

65. Papp, J.P. Metal fume fever. Postgrad. Med., 43: 160 (1968).

66. Prasad, A.S., Brewer, G.J., Schoomaker, E.B. et Rabbani, P. Hypocupremia induced by zinc therapy in adults. J. Am. Med. Assoc., 240: 2166 (1978).

67. Campbell, J.K. et Mills, C.F. Toxicity of zinc to pregnant sheep. Environ. Res., 20: 1 (1979).

68. Klevay, L.M. Interactions of copper and zinc in cardiovascular disease. Ann. N.Y. Acad. Sci., 355: 140 (1980).

69. Katya-Katya, M., Ensminger, A., Mejean, L. et Derley, G. The effect of zinc supplementation on plasma cholesterol levels. Nutr. Res., 4: 663 (1984).

70. Chandra, R.K. Excessive intake of zinc impairs immune responses. J. Am. Med. Assoc., 252: 1443 (1984).

71. Cohen, J.M., Kamphake, L.J., Harris, E.K. et Woodward, R.L. Taste threshold concentrations of metals in drinking water. J. Am. Water Works Assoc., 52: 660 (1960).

72. Anderson, E., Reinhard, C. et Hammel, W. The corrosion of zinc in various waters. J. Am. Water Works Assoc., 26: 49 (1934).